무선 에너지 하비스팅 네트워크에서의 전력 제어 기법

황유민*, 신동수**, 김진영*

Power Control in RF Energy Harvesting Networks

Yu Min Hwang*, Dong Soo Shin**, and Jin Young Kim*

요 약

본 논문에서는 RF 에너지 하비스팅 네트워크에서 최대 전송 파워량 제한 및 최소 채널 용량 달성에 관한 제약조건을 만족시키며 에너지 하비스팅율과 채널 용량을 최대화 시키는 연구를 진행하였다. 전력 분할 기법 (power-splitting scheme) 기반 안테나로 구성된 주파수 분할 다중접속 환경에서 하나의 액세스 포인트 (access point)로부터 무선 에너지와 정보를 사용자들에게 동시에 송수신하는 모델을 가정하였다. 네트워크 성능 지표로서 에너지 효율 (energy efficiency)을 정의하고 이를 최대화 시킬 수 있는 Lagrange 이중 분해 기반의 최적화 솔루션을 제안하였다. 모의실험 결과를 통해 제안한 솔루션이 설정된 제한조건들을 만족하면서 효과적으로 에너지 효율을 최대화시키는 것을 확인하였다.

Key Words : RF energy harvesting, energy efficiency, power control, power-splitting antenna, Lagrange dual method

ABSTRACT

This paper aims to maximize the energy harvesting rate and channel capacity in RF-energy harvesting networks (RF-EHNs) under the constraints of maximum transmit power and minimum quality of service (QoS) in terms of rate capacity for each user. We study a multi-user RF-EHN with frequency division multiple access (FDMA) in a Rayleigh channel. An access point (AP) simultaneously transmitting wireless information and power in the RF-EHN serves a subset of active users which have a power-splitting antenna. To gauge the network performance, we define energy efficiency (EE) and propose an optimization solution for maximizing EE with Lagrangian dual decomposition theory. In simulation results, we confirm that the EE is effectively maximized by the proposed solution with satisfying the given constraints.

I. 서 론

최근 무선 에너지 하비스팅 분야가 “친환경 통신 (green communications)”의 하나로 인기가 높아지고 있다 [1]. 이론적으로는 무선 에너지 하비스팅 기술을 이용하여 전송된 radio frequency (RF) 신호를 통해서 정보 복조와 무선 에너지 충전 (SWIPT: imultaneous wireless information and power transfer)이 동시에 가능하다 [2]. 무선 에너지 하비스팅 네트워크 (RF-energy harvesting network)에서, 사용자들이 현재 보유하고 있는 배터리 에너지만으로 통신하는 기존의 통신 환경과 비교할 때 무선 전력 전송은 사용자가 지속적으로 무선으로 에너지를 충전함으로서 지속 가능한 통신 환경을 제공하는 무선 전력 공급자 역할을 한다.

기존의 무선 네트워크, 특히 무선 센서 네트워크 [3] 에서는 에너지 제한으로 인해 네트워크 성능을 한정되기 때문에 무선 전력 전송을 이용한 효과적인 네트워크 성능 향상 연구가 최근 지속적으로 진행되고 있다. 참고문헌 [4] 에서는 최대 처리량 달성을 위해 single-input single-output (SISO) 시스템에서 효율적 무선 전력 전송 연구를 진행하였고, [5-8] 에서는 파워 분할 안테나 (power splitting antenna) 기반의 다양한 무선 에너지 하비스팅 시나리오를 연구하였다. 그러나 기존 연구들은 outage 확률 기반의 최소 채널 용량 달성 및 최대 전송 전력 제한과 같은 실질적이고 구현 관점에서 도출되는 제한 조건들을 포함하여 동작하는 시나리오를 고려하지 못하고 있다. 따라서 실질적인 시스템 동작 환경을 고려하여 채널용량 달성에 대한 outage 확률 제한 조건을 도출하여 무선 에너지 하비스팅 망의 통신 제한 조건으로 부여하고 이를 만족시키면서 무선 에너지 하비스팅 망의 성능을

※ 본 연구는 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2014R1A5A1011478).
*광운대학교 유비쿼터스 통신 연구실 (yumin@kw.ac.kr, jinyoung@kw.ac.kr). **국방대학교 국방과학학과 (sds01@korea.kr).
접수일자 : 2017년 5월 9일, 최종게재확정일자 : 2017년 5월 26일

최대화 시키는 최적화 방법론에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 무선 에너지 하비스팅 망에서 망 에너지 효율(energy efficiency)을 정의하고 하향링크 전송 전략 관점에서 이를 최대화하는 최적 자원 할당 솔루션을 제안하고자 한다. 또한 에너지 효율은 앞서 필요성을 제시한 것처럼, 실질적인 제한 조건들을 동시에 만족하면서 제한된 전송 전력 자원 내에서 최대값을 도달해야하며, 이를 위해 non-linear fractional programing 및 Larange dual method를 이용하여 최적화 솔루션을 본 논문에서 제안한다.

이 후 논문의 전개는 제 2장에서 시스템 모델 소개 및 망 에너지 효율을 정의하고, 제 3장에서 에너지 효율 최대화 솔루션을 제안한다. 제 4장에서 모의실험 결과를 통해 제안한 솔루션의 성능을 분석하고, 제 5장에서 결론을 짓는다.

Ⅱ. 시스템 모델 및 에너지 효율 정의

본 장에서는 다중 사용자 무선 에너지 하비스팅 네트워크의 하향링크 관점에서 에너지 효율과 제한 조건들을 정의한다. 먼저 무선 에너지 하비스팅 네트워크에서는 그림 1과 같이 무선 RF 신호 송신을 통해 정보와 에너지를 동시에 전달하는 access point (AP)가 존재하고 K 명의 사용자들이 AP에 접속해 있는 시나리오를 가정한다 ($k \in 1, \ldots, K$). 여기서 각 사용자들은 전력-분할 (power-splitting) 기반 단일 안테나를 사용한다.

1. 채널 모델

채널 모델은 전력 분할 안테나를 가지는 사용자 기반으로 하는 Rayleigh fading 채널 모델로 정의된다. k 번째 사용자 ($1 \le k \le K$)의 수신 신호 y_k^{ID} 는 다음과 같이 정의된다.

$$y_k^{ID} = \theta_k h_k x_k + n_k, \tag{1}$$

여기서 θ_k는 전력 분할 안테나에서 신호 전력을 수신했을 때 신호 복조를 위한 전력과 에너지 하비스팅을 위한 전력으로 분할하는 분할 비율을 나타내는 상수이다 ($0 \le \theta_k \le 1$). h_k는 정보 복조 (ID :Information decoding)와 에너지 하비스팅 (EH: energy harvesting)을 위한 독립적인 Rayleigh fading 채널이고 complex normal distribution CN(0,1)을 따른다. $x_k = \sqrt{p_k}\, s_k$는 송신 신호이고 여기서 p_k는 송신 파워, s_k는 정보 심볼이며 $E[|s_k|^2] = 1$ 로 가정한다. Additive noise n_k는 평균 0, covariance $n_o W_k$를 갖는 complex Gaussian vector이며 여기서 n_o는 noise power spectral density, W_k는 주파수 대역이다.

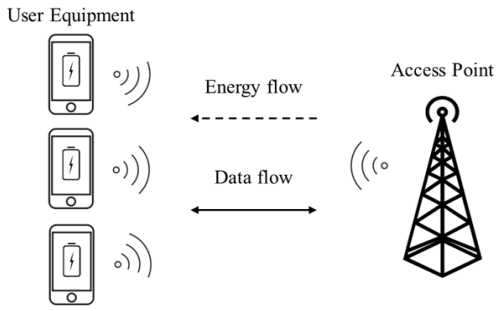

그림 1. 다중 사용자 무선 에너지 하비스팅 네트워크.

2. 채널 용량

사용자 k 에 대한 채널 용량 c_k는 다음과 같다 [9].

$$c_k(p_k, \theta_k) = W_k \log_2 (1 + \frac{\theta_k p_k |h_k|^2}{N_0 W_k}), \tag{2}$$

$\rho_k = \theta_k p_k / N_o W_k$는 사용자 k 에 대한 Signal-to-noise ratio (SNR)이고 p_k는 AP의 송신 전력 이다. 네트워크 총 채널용량 C는 다음과 같다.

$$C(p_k, \theta_k) = \sum_{k=1}^{K} c_k(p_k, \theta_k). \tag{3}$$

3. 네트워크 전력 소모량

네트워크의 전체 파워 소모량 (Watt)은 다음과 같다.

$$P(p_k, \theta_k) = \sum_{k=1}^{K} \left(\zeta p_k + p_k^c - p_k^{EH}\right), \tag{4}$$

ζ는 파워 증폭기의 비효율을 나타내는 상수 값으로 만약 ζ값이 5라면, RF 신호 1Watt를 송신하는데 5Watt 소모된다. AP로부터 하비스팅 된 RF 에너지는 다음과 같다.

$$p_k^{EH} = (1 - \theta_k)\eta h_k x_k, \tag{5}$$

파라미터 $0 \le \eta \le 1$은 하비스팅 된 에너지에서 DC 파워로 변환하는데 손실되는 비효율 상수이다.

4. 네트워크 에너지 효율(EE)

앞서 정의한 채널 용량과 전력 소모량을 이용하여 네트워크 에너지 효율 EE를 다음과 같이 정의한다.

$$\max_{(p_k, \theta_k)} EE = \sum_{k=1}^{K} EE_k = \sum_{k=1}^{K} \frac{C(p_k, \theta_k)}{P(p_k, \theta_k)}, \tag{6}$$

에너지 효율은 다음 제약조건을 만족해야한다.

$$\sum_{k=1}^{K} p_k \le p_{\max}, p_k \ge 0, \forall k \in K. \tag{7}$$

$$\Pr[c_k(p_k, \theta_k) \le c_k^{QoS}] \le \epsilon, \forall k \in K. \tag{8}$$

$$0 \le \theta_k \le 1 \quad \forall k \in K. \tag{9}$$

식 (6)은 본 논문의 최적화 문제에서 목적 함수이다. 식 (6)은 non-convex NP-hard 문제이며 제 3장 에서 convex

함수로 변형시키는 방법을 통해 최적화를 진행한다. 제약조건 (7)은 전체 사용자에 대한 전송 출력의 합은 $p_{\max}$로 제한하는 것이다. 제약조건 (8)은 사용자 각각은 채널용량의 최소 달성값 c_k^{QoS}를 충족시켜야 하며 이를 충족시킬 확률은 ϵ 미만으로 제한하는 것이다.

Ⅲ. 에너지 효율 최적화

본 장에서는 앞서 정의한 목적 함수인 에너지 효율을 최대화하는 솔루션을 기술한다. 목적함수 에너지 효율은 잘 알려진 non-convex 함수로서 이를 최대화시키기 위해 Brute-force 접근 방법으로 최적 해를 찾을 수 있으나 매우 복잡도가 높기 때문에 적절하지 못하다. 따라서 에너지 효율 함수를 convex 함수로 변형시키기 위해 본 논문에서 nonlinear fractional programming [11]을 이용하며 이 후 Lagrangian dual decompositon을 이용하여 효과적으로 최적 해를 찾고자 한다.

Nonlinear fractional programming [11]을 이용하면 다음과 같이 수식 (6)이 convex 함수로 변형될 수 있다.

$$\max\{C(p_k,\theta_k)-EE^*P(p_k,\theta_k)\}, \tag{10}$$

제약조건은 앞서 제시한 (7)~(9)를 따른다.

1. Outage 제한 조건의 Closed-form 도출

제약조건 (8)을 이후 변형된 목적함수 (10)를 최적화하기 위한 Lagrange 이중 분해 기법에 적용하기 위해 closed-form 표현으로 변환이 필요하다. 변환 과정은 다음과 같다 [12].

$$\begin{aligned}
&\Pr[c_k(p_k,\theta_k)\le c_k^{QoS}]\le\epsilon.\\
&\Leftrightarrow\Pr[W_k\log_2(1+\frac{\theta_k p_k|h_k|^2}{N_0W_k})\le c_k^{QoS}]\le\epsilon.\\
&\Leftrightarrow\Pr[|h_k|^2\le\left(\exp(\frac{c_k^{QoS}*\ln 2}{W_k})-1\right)*\left(\frac{N_0W_k}{\theta_k p_k}\right)]\le\epsilon.\\
&\Leftrightarrow 1-\exp\left(\left(1-\exp(\frac{c_k^{QoS}*\ln 2}{W_k})\right)*\left(\frac{N_0W_k}{\theta_k p_k}\right)\right)\le\epsilon.
\end{aligned} \tag{11}$$

여기서 식 (11)을 아래 식 (12)와 같이 재 정의한다.

$$\begin{aligned}
&\psi(p_k,\theta_k)=\\
&\ln(1-\epsilon)-\left(1-\exp(\frac{c_k^{QoS}*\ln 2}{W_k})\right)*\left(\frac{N_0W_k}{\theta_k p_k}\right)\le 0.
\end{aligned} \tag{12}$$

2. 최적 자원 할당

변형된 목적함수 (10)의 최대값을 산출하기 위해 식 (10)을 기반으로 Lagrange 이중 분해 방법을 이용하고자 한다. Lagrange dual problem은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
L(p_k,\theta_k,\alpha,\beta,\gamma,\delta)&=\sum_{k=1}^{K}c(p_k,\theta_k)\\
&-\alpha\left(\sum_{k=1}^{K}p_k-p_{\max}\right)-EE(\sum_{k=1}^{K}\left(\zeta p_k+p_k^c-p_k^{EH}\right)\\
&-\beta\psi(p_k,\theta_k)+\gamma(1-\theta_k)+\delta\theta_k,
\end{aligned} \tag{12}$$

여기서 α,β,γ 그리고 δ는 Lagrange 승수이다 [13]. 식 (12)와 Karush-Kuhn_tucker(KKT) 조건을 이용하면 최적화하려는 파라메터 p_k 와 θ_k의 최적값을 구할 수 있다.

Ⅳ. 모의 실험

본 장에서는 제안한 최적화 솔루션에 따른 에너지 효율에 대한 모의실험 결과를 확인한다. 실험에 사용된 파라미터 값은 표 1과 같다. 사용자 1~8과 AP와의 거리는 4, 6.1, 8.5, 8.37, 4.46, 1.31, 2.35 그리고 9.13 (meter)로 설정되었다.

표 1. 모의실험 파라미터.

파라미터	값	파라미터	값
사용자 수	8	ζ	5
$p_k(1)$	2 mW	ξ_k	0.7
f_c	1.8 GHz	c_k^{QoS}	4 Mbps
W_k	50 kHz	ϵ	0.05
N_oW_k	-119.23 dBm	$p_{\max}$	27 dBm

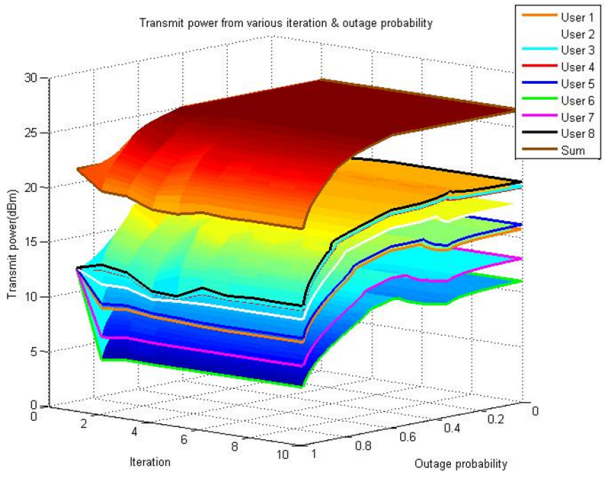

그림 2. 반복횟수 및 outage 확률에 따른 전송 출력 최적 할당 성능.

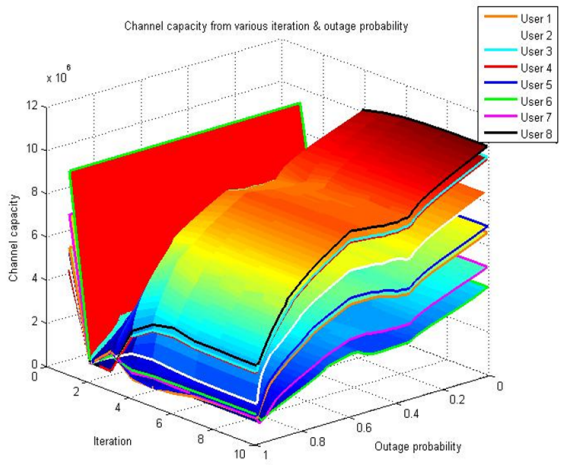

그림 3. 반복횟수 및 outage 확률에 따른 채널 용량 최적 할당 성능.

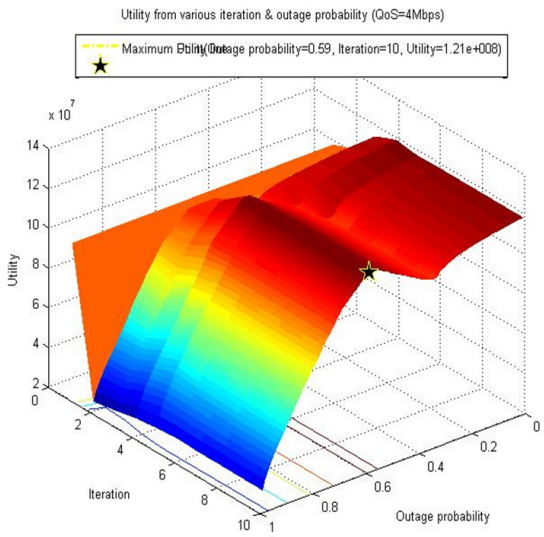

그림 4. 반복횟수 및 outage 확률에 따른 에너지 효율(Utility) 성능.

그림 2는 반복 횟수(iteration)와 outage 확률에 따라 변화하는 최적의 전송 출력값을 나타낸다. 그림에서 최초 모든 사용자가 동일한 전송 출력값을 갖다가 반복 횟수가 증가함에 따라 전송 출력이 각 사용자에게 최적화 되는 트랜드를 확인할 수 있다. 모든 사용자의 전송 출력의 합(Sum) 그래프가 모의실험 파라메터에서 설정한 최대 전송 출력을 27 dBm을 넘지 않고 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 3은 반복횟수 및 outage 확률에 따른 사용자 개개인이 달성한 채널 용량 그래프를 나타낸다. 모든 사용자에 대해 전체적인 그래프의 움직임은 채널 용량이 outage 확률 증가에 따라 감소하는 형태를 갖는다. 한편으로 채널용량을 거리에 따라 살펴보면, AP로부터 가장 멀리 위치하는 사용자 8번이 가장 높은 채널 용량을 갖고 반대로 가장 가까이 위치하는 사용자 6번이 가장 낮은 채널 용량을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이것은 최적화 과정에서 가장 가까이 위치하는 사용자 6번이 네트워크 에너지 효율을 가장 최대화하기 위해 채널 용량 c_k과 하비스팅 에너지 p_k^{EH}중에서 하비스팅 에너지를 증가시키는 방향으로 에너지 효율을 최대화 하는 것이 효과적일 때 발생하는 현상이라고 볼 수 있다. 채널용량과 에너지 하비스팅 량은 파워분할비율 θ_k를 조절하여 조정 가능하며 파워분할비율을 최적화 파라메터로 설정했기 때문에 그림 3과 같은 그래프 트랜드를 확인할 수 있다.

그림 4는 반복 횟수 및 outage 확률에 따라 변화하는 에너지 효율 (utility) 값을 보여주고 있다. 에너지 효율을 그림 2, 3에서 보여주는 송신 전력값과 채널 용량값을 이용하여 계산된 것이다. 에너지 효율은 전반적으로 반복 횟수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이며, outage 확률값에 따라서는 일정하지 않은 변화 양상을 갖는다. 그러나 outage 확률값을 0.59로 설정했을 때 에너지 효율이 최대값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 0.59 값은 일반적 통신 시스템에서 매우 큰 값에 해당하며 사용자의 채널 용량을 확보하는데 실용적인 측면에서 적절하지 않을 수 있으나, 제안한 시스템 모델에서는 ID와 EH가 공존함에 따라 서비스 품질 (QoS: quality of service [bps])을 에너지 하비스팅을 위해 희생되는 현상이라고 볼 수 있다. 즉 무선 에너지 하비스팅망에 접속하여 에너지 하비스팅과 정보 복조를 동시에 수행하는 사용자는 QoS의 패널티를 감수해야하는 상황에 처할 수 있다. QoS를 보장받기 위해서는 전력분할비율 θ_k를 정보 복조를 위한 전력으로 온전히 사용할 수 있도록 조절해야한다. 본 시스템 모델에서는 에너지 효율을 극대화하기 위해 전력분할비율 최적화하기 때문에 outage 확률의 희생이 요구되는 결과를 얻은 것으로 생각할 수 있다.

Ⅴ. 결론

본 논문은 다중 사용자를 기반으로 하는 무선 에너지 하비스팅 망에서 에너지 효율을 최대화하기 위해 송신 전력과 수신 전력 분할 비율을 최적으로 제어하기 위한 최적화 솔루션을 제안하였다. 모의실험 결과를 통해 제안한 최적화 솔루션이 사용자의 QoS를 보장하면서 에너지 효율을 최대화시키는 최적해를 도출하는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] X. Lu, D. Niyato, P. Wang, D. I. Kim, and Z. Han, “Wireless charger networking for mobile devices: fundamentals, standards, and applications,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 22, no. 2, pp. 126-135, Apr. 2015.

[2] R. Zhang and C. K. Ho, “MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12 , no. 5, pp.

1989-2001, May 2013.
[3] S. Shrestha, S. K. Noh, and D. Y. Choi, "Comparative study of antenna designs for RF energy harvesting," *Int. J. Antennas and Propagation*, vol. 2013, pp. 1-10, Apr. 2013.
[4] L. Xiao, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey," *IEEE Commun. Surveys and Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 757-789, May 2015.
[5] K. Zheng, S. Ou, and X. Yin, "Massive MIMO channel models: A survey," *Hindawi Int. J. Antennas Propagation*, vol. 2014, pp. 1-10, June 2014.
[6] K. Huang and E. G. Larsson, "Simultaneous information and power transfer for broadband downlink systems," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 61, no. 23, pp. 5972 - 5986, Dec. 2013.
[7] L. R. Varshney, "Transporting information and energy simultaneously," *Proc. IEEE Int. Symp. Information Theory (ISIT)*, pp. 1612-1616, July 2008.
[8] X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho, "Wireless information and power transfer: architecture design and rate-energy tradeoff," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 11, pp. 4757-4767, Nov. 2013.
[9] C. A. Balanis, "Antenna theory: analysis and design," John Wiley & Sons, 2012.
[10] D. Gesbert, M. Shafi, D. Shiu, and P. Smith, "From theory to practice: An overview of space-time coded MIMO wireless systems," *IEEE J. Sel. Areas. Commun. (JSAC)*, vol. 21, no. 3, pp. 281-302, Apr. 2003.
[11] W. Dinkelbach, "On Nonlinear Fractional Programming," Management Science, vol. 13, pp. 492 - 498, Mar. 1967. [Online]. Available: http://www.jstor.org/stable/2627691
[12] Z. Wang and G. Giannakis, "Outage mutual information of space-time MIMO channels," *IEEE Trans. Information Theory*, pp. 657-662, Apr. 2004.
[13] S. Boyed and L. Vandenberghe, Convex Optimization. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2004.

저자

황 유 민(Yu Min Hwang) **준회원**

· 2012년 2월 : 광운대학교 전파공학과 학사 졸업
· 2012년 3월~현재 : 광운대학교 전파공학과 석·박사통합과정

<관심분야> : 디지털 통신, 무선에너지하비스팅, 무선 측위 시스템.

신 동 수(Dong Soo Shin)

· 2015년: 광운대학교 공학박사
· 2007년: 국무총리 표창 (국가안전보장 기여)
· 2006년~2016년: 방위사업청
· 2016년~현재: 국방대학교 국방과학학과 교수

<관심분야> : 무기체계 과학적 사업관리, 위성항법 및 측위 기법

김 진 영(Jin Young Kim) **종신회원**

· 1998년 2월 : 서울대학교 전자 공학과 공학박사
· 2001년 2월 : SK텔레콤 네트웍 연구소 책임연구원
· 2001년 3월~현재 : 광운대학교 전자융합공학과 교수

<관심분야> : 디지털통신, 가시광통신, UWB, 부호화, 인지무선통신, 5G 이동통신, 무선 에너지 하비스팅